

SOUVISLOST GEOMETRICKÉHO MODULU ODLITKU S PROCESEM TUHNUTÍ A VNITŘNÍHO NAPĚTÍ

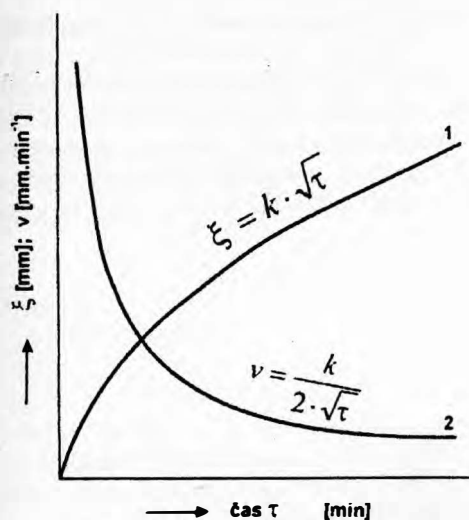
F. HAVLÍČEK¹

Anotace: Fázová přeměna tekutého kovu v pevný stav - tuhnutí, je hlavní fází tvorby odlitku. Je složitou komplexní závislostí tepelných, fyzikálně-chemických a geometrických činitelů. Ovlivňuje strukturu a vnitřní homogenitu materiálu odlitku, stupeň odměšení, rozsah polohu vycezenin, stažení a ředin, smršťovací a tepelnou napjatost odlitku a z toho vzniklé vady poruchy soudržnosti materiálu. Tuhnutí ovlivňuje také hodnoty mechanických vlastností materiálu.

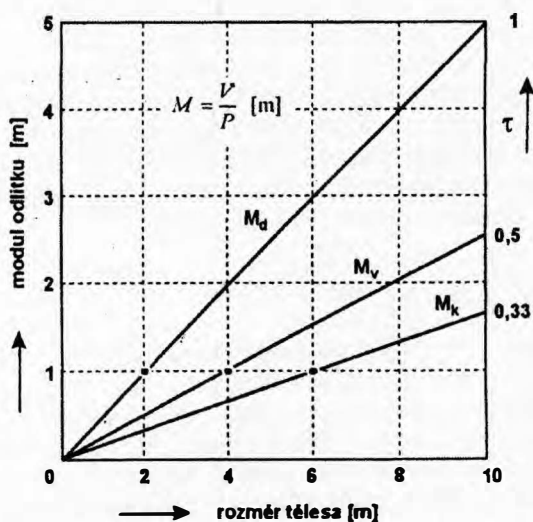
MODUL ODLITKU M_0

Tuhnutí odlitku od povrchu k jeho ose v závislosti na čase se v podstatě řídí parabolickou závislostí (kř.1, obr.1):

$$\xi = k \cdot \sqrt{\tau} \quad (\text{m}) \quad (1)$$



Obr. 1 - Tloušťka ztuhlé vrstvy a rychlost tuhnutí



Obr. 4 – Moduly desky, válce a koule

Derivací křivky získáme rychlost tuhnutí (kř.2, obr.1):

$$v = \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{k}{2\sqrt{\tau}} \quad (\text{m} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (2)$$

Kde: ξ - tloušťka ztuhlé vrstvy (m)

k - koeficient tuhnutí ($\text{m} \cdot \text{h}^{1/2}$)

τ - čas (h)

¹ Prof. Ing. František Havlíček – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava, ČR.

Doba tuhnutí je z toho dána vztahem:

$$\tau = \left(\frac{\xi}{k} \right)^2 \quad (3)$$

V okamžiku ztuhnutí, kdy $\xi = S/2$ nebo $d/2$ odlitku, lze také ztuhlou tloušťku ξ nahradit modulem odlitku M_o :

$$\tau = \left(\frac{M_o}{k} \right)^2 \quad (4)$$

Koeficient k je závislý na řadě fyzikálních veličin a chemickém složení materiálu: ve zjednodušené formě má výraz:

$$k = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{T_s \cdot b_f}{[L + (T_{liq} - T_s)c_k] \rho_k} \quad (5)$$

Kde: T_s – teplota solidu ($^{\circ}\text{C}$)

b_f – součinitel tepelné akumulace formy ($\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

L – skupenské teplo krystalizace ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1}$)

c_k – měrné teplo kovu ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ρ_k – měrná hmotnost taveniny ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Rovnice (1) s odpovídající hodnotou koeficientu k byla původně použita Schwarzem /2/ a Stefanem pro určení postupu promrzávání půdy. Výsledky výzkumu ukázaly, že i postup tuhnutí pevné fáze u odlitku se přibližuje zákonu paraboly, takže rovnice (1) s koeficientem $k/5$ poměrně dobře vystihuje tuhnutí deskovitých útvarů, kde jsou zachovány přibližně konstantní podmínky ochlazující plochy tekutou fází. U ostatních základních geometrických tvarů odlitků, válce, koule, hranolu a krychle jsou teplofyzikální podmínky tuhnutí složitější /4, 8/. Příčina spočívá v rozdílném objemu kovu a ochlazujícího povrchu u těchto těles. Tím je také rozdílná doba jejich tuhnutí. Tuto závislost vyjádřil N. Chvorinov v roce 1940 /4/ vztahem:

$$R = \frac{V}{P} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

Kde: V – objem tuhnoucího kovu (m^3)

P – ochlazující povrch (m^2)

Nejprve jej Chvorinov označil jako „velikostní koeficient, dále „tloušťkový ekvivalent“ a nebo „směrnou tloušťku“. Později jako „relativní tloušťku R “, neboť jde o relativní rozměr tloušťky pro různé geometrické tvary odlitků tuhnoucí podle zákona paraboly. V současné době se tento vztah označuje jako „modul odlitku M_o “, čili poměrnou jednotku působících veličin:

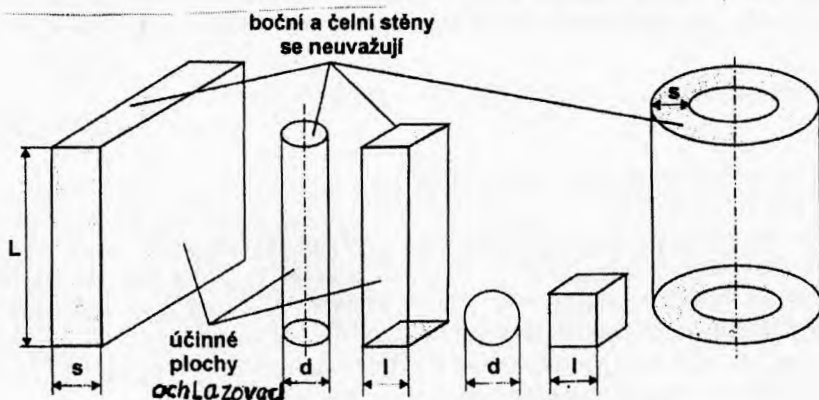
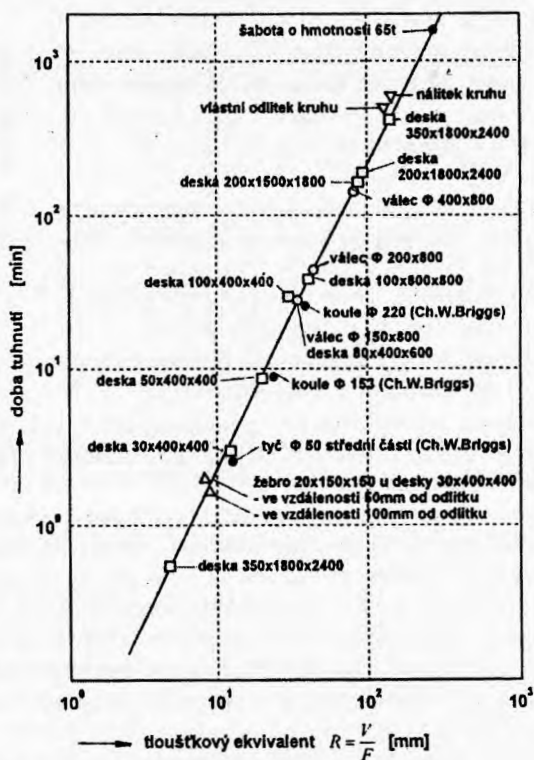
$$M_o = \frac{V}{P} \quad (\text{m}) \quad (7)$$

Z hlediska významové přesnosti, kdy modul vyjadřuje podmínky tuhnutí všech geometricky rozdílných těles, je přesnější výraz „relativní geometrický modul odlitku“. Jde v podstatě o tři geometricky rozdílná tělesa s jejich objemem a povrchem nebo zjednodušeně plochou průřezu a jejím obvodem. Poměrem objemu a povrchu, kterékoliv z nich dostaneme obecný modul, užívaný v řadě oborů. Teprve aplikací tohoto poměru do procesu tuhnutí kovů získal modul M_o (nyní již odlitku) svůj význam ve slévárenském procesu.

Na základě výsledků experimentů a literárních údajů (CH.W. Briggs) sestavil Chvorinov /3/ diagram závislosti doby tuhnutí a relativní tloušťky $R = V/P$ (původní označení) (obr.2). Uvedený modul odlitku vyjádřený podílem objemu k povrchu je však obecný a žádá si dalšího upřesnění. Především je nutno určit tvar a velikost skutečně ochlazované plochy vzhledem k době tuhnutí daného odlitku.

Pro aplikace u konstrukčně rozdílných odlitků je proto modul stanoven pro tvar desky, válce (hranolu) a koule (krychle), u nichž lze přesně definovat objem a povrch. Doba tuhnutí odlitku odpovídá postupu tuhé fáze od povrchu v kolmém směru do jeho tepelné osy bez ovlivnění odvodu tepla bočními stěnami. Proto se při stanovení ochlazujícího povrchu vyloučily obvodové plochy u tělesa desky a čelní plochy u válce a hranolu. Aby tato podmínka byla exaktní, předpokládá polonekonečnost těles. Pro technologické účely vyhovuje nejmenší poměr délky k tloušťce (průřezu tělesa) 5:1. U odlitku desky je to plocha: $4 \cdot L \cdot S$, kde S – tloušťka stěny, L – délka strany. U odlitku válce $2 \cdot \pi \cdot d^2/4$, u hranolu $2 \cdot l^2$. O tyto hodnoty je ochlazovací plocha menší, modul odlitku M_0 větší a doba tuhnutí delší. U koule a krychle není redukce, na tuhnutí se podílí celý povrch, proto modul koule je nejmenší a doba tuhnutí nejkratší. Další podmínkou pro určení modulu odlitku je, že tloušťka desky S , průměr válce d (šířka stěny hranolu l) a průměr koule d (nebo šířka stěny krychle l) mají stejný rozměr (obr.3).

Obr. 2 – Závislost doby tuhnutí a relativní tloušťky u různých těles (Chvorinov)



Obr. 3 – Základní tělesa k určení modulu M_0

Podle těchto zásad vychází.

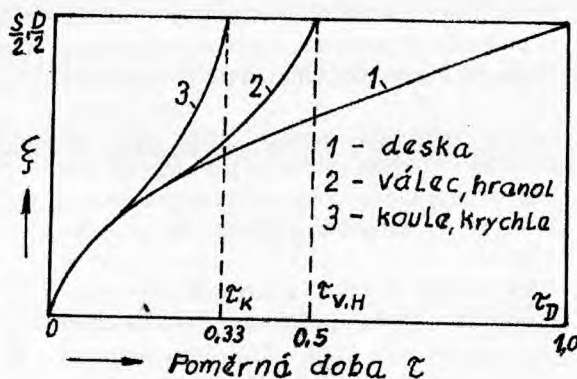
$$\text{Deska: } M_d = \frac{S}{2} \quad (\text{m}) \quad (8)$$

$$\text{Válec(hranol): } M_v = \frac{d}{4} \quad (\text{m}) \quad (9)$$

$$\text{Koule (krychle): } M_k = \frac{d}{6} \quad (\text{m}) \quad (10)$$

Odlitek desky tuhne pouze od dvou rovnoběžných stěn formy směrem do osy stěny odlitku, takže ochlazující povrch je vyjádřen číslem 2. Modul desky odpovídá polovině tloušťky stěny S . Modul válce je odvozen z plochy kruhu $\pi \cdot d^2/4$ dělené jejím obvodem $\pi \cdot d$, s výsledkem $d/4$. Rovněž tak modul koule nebo krychle, $d/6$.

Graficky jsou moduly válce a koule uvedeny na obr.4. Diagram vyjadřuje závislost rozměru tělesa modulu odlitku a poměrné doby tuhnutí (válce a koule vzhledem k době tuhnutí desky). Je-li doba tuhnutí desky 1, potom válec (o stejném průměru jako tloušťka desky) ztuhne za poloviční dobu (0,5) a koule již za 1/3 doby (0,33).



Obr. 5

Za těchto předpokladů jsou postup tuhnutí ξ a doba tuhnutí τ uvedeny obr.5. Nejdéle tuhne odlitek desky, nejkratší dobu odlitek koule. Z průběhu křivek válce a koule vyplývá, že u těchto odlitků dochází za určitou dobu ve středové oblasti za inflexním bodem k ohybu křivek a tím ke zkrácení doby tuhnutí. To je vyvoláno zvýšenou rychlostí tuhnutí v osových oblastech odlitku, které označujeme jako urychlené tuhnutí (obr.6) /5/. Tento děj na první pohled neskutečný je vyvolán zákonitým procesem tuhnutí a jeho průvodními jevy. Především s postupným narůstáním ztuhlé vrstvy kovu, tedy se zmenšením rozměru tělesa (obr.4), klesá modul odlitku, protože převažuje povrch nad objemem a stoupá rychlost tuhnutí. Podstata je v tom, že pokles objemu při tuhnutí V , je větší než pokles jeho povrchu P , který je nyní povrchem „ochlazujícím“, protože jeho teplota je nižší než teplota zbylé taveniny. Takže i zde je souvislost modulu odlitku s procesem tuhnutí, protože jej urychluje.

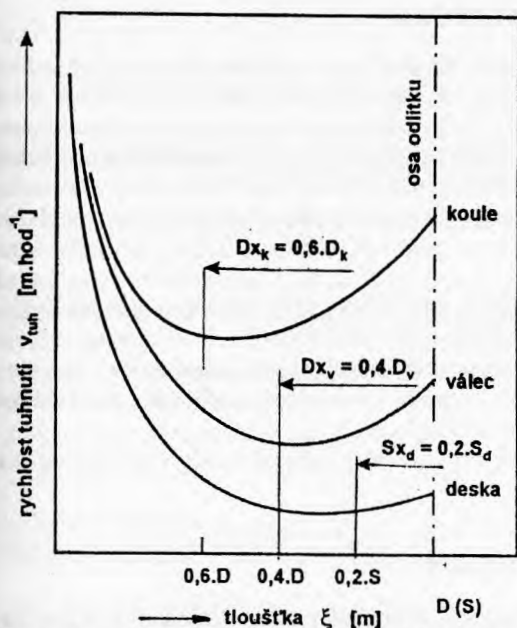
Druhým a hlavním činitelem na proces tuhnutí mají ovšem tepelné děje v odlitku, hlavně tepelné toky vyvolané teplotními gradienty v odlitku, v hraničním pásmu odlitek – forma a ve formě nebo v kokile.

Tepelný tok je dán vztahem: $q = \alpha(\Delta T)$ ($V \cdot m^{-2}$) (11)

Kde: α – součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}$)
 ΔT – rozdíl teplot ($^{\circ}C$)

V prvním okamžiku odlití odlitku dochází vlivem vysokého rozdílu teplot ΔT_1 (až $1500^{\circ}C$) mezi odlitkem a formou k tepelnému „šoku“ – tepelnému toku q_1 z odlitku směrem do formy (obr.7). V důsledku toho se vyvolá vysoká rychlost tuhnutí, která v zápětí (poklesem gradientu teplot) náhle klesá. Jejím poklesu brání opačně působící tepelný tok vyvolaný modulem odlitku i účinnější vznikající tok tepla q_2 zevnitř k povrchu odlitku, v důsledku teplotního gradientu ΔT_2 v jeho průřezu, čímž se vnitřek odlitku ochlazuje a rychlost tuhnutí zvyšuje (obr.6).

Tento tepelný děj, snížení přestupu tepla q_1 z odlitku do formy a vzestupu množství tepla q_2 zevnitř k povrchu odlitku pokračuje, až se oba tepelné toky vyrovnají, tzn. $q_1 = q_2$. Tímto okamžikem dochází k závažnému ději v procesu dalšího tuhnutí a následného chladnutí odlitku. Mění se intenzita ochlazování odlitku a způsob dalšího tuhnutí vnitřní oblasti a mění se také napěťový stav v odlitku. V povrchové oblasti jsou nyní tlaková a ve středové oblasti se vyvíjejí tahová napětí, která trvají až do úplného vychladnutí odlitku. Proto lze prvou část tuhnutí odlitku označit jako I. fázi tuhnutí, vnitřní část jako II. fázi tuhnutí. Každá tato fáze je charakterizována tloušťkou ztuhlé části odlitku a dobou jejího ztuhnutí. Pro každý odlitek jsou tyto údaje rozdílné. Řídí se velikostním činitelem odlitku, druhem formy, teplotu lité kovu aj. Prvá fáze je charakterizována velkou rychlostí tuhnutí a tahovým napětím v kovu s možností vzniku povrchových vad soudržnosti materiálu, nejčastěji podélných trhlin u válcových odlitků nebo trhlin u tvarových odlitků.



Obr. 6 – Schéma průběhu nerovnoměrné rychlosti v průřezu odlitku u základních těles

Ve druhé fázi tuhnutí nastává urychlené tuhnutí a chladnutí středové oblasti (obr.6), současně s vývojem tahového vnitřního tepelného napětí. Oba průvodní jevy urychleného chladnutí středu jsou pro kvalitu odlitku škodlivé. Zvýšená rychlost tuhnutí totiž silně omezuje průběh dalšího fyzikálního děje, čímž je penetrace (průnik) taveniny sítí dendritů v pásmu tuhnutí, čímž se sníží objem ředin v osové části odlitku. Penetrace taveniny naopak vyžaduje pomalé ochlazování prostředí k jejímu plnému rozvoji. Odvozený vzorec pro tyto podmínky tuhnutí uvádí Vejnik /7/.

$$v_{tuh} = \frac{A \cdot a_1}{\xi(2B_2 + 3B_3 \cdot \frac{\xi}{r})} \quad (\text{m} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (12)$$

Kde: A – tvarový činitel; vyjadřuje vliv tělesa na intenzitu ochlazování, je určen plochy F tělesa k ploše F₀ tělesa základního; pro válec (hranol) je A=1

B₂, B₃ – odvozené vztahy $1/4 + 1/2 N - 1/3(1/3 + 1N)$, kde N je kritérium: $c_1(t_{kr} - t_k)$

a₁ – tepelná vodivost $a = \lambda / c \cdot \rho$ (m²·h⁻¹)

c₁ – měrné teplo kovů (J · Kg⁻¹·deg⁻¹)

t_{kr} – teplota krystalizace (°C)

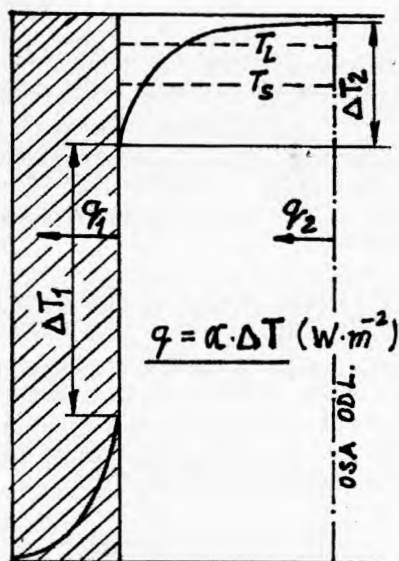
t_k – kalorimetrická teplota (°C)

r – poloměr odlitku (m)

ξ - tloušťka ztuhlé vrstvy (m)

Druhým průvodním jevem výše uvedených tepelných procesů je vznik a další vývoj tahového napětí ochlazováním a smršťováním centrálních částí odlitku. Může vyvolat v oblasti vysokých teplot příčné trhliny. Při nižších teplotách (cca 550°C a níže) s převažujícími elastickými deformacemi materiálu příčné praskliny, vycházející z centra odlitku a šířící se průřezem k povrchu, což jsou zcela destruktivní vady.

Teoretický rozbor této problematiky z hlediska teplofyziky struktury a vlastností materiálu za vyšších teplot a experimentální výzkum tepelných procesů v odlitku i s aplikací akustické emise, objasnil příčiny vzniku těchto vnitřních poruch u masivních odlitků v procesu tuhnutí, chladnutí a tepelného zpracování /4,5,8,9,11,14,15,20/.



Obr. 7

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Za účelem stanovení teplotního pole, gradientu teplot v odlitku i ve formě při jeho tuhnutí a chladnutí, rychlost tuhnutí v jeho průřezu a vývoj šířky pásma tuhnutí, intenzitu teplotních toků v odlitku a v hraničním pásmu odlitek – forma se provedla termická měření v pokusných odlitcích válce průměru 550mm a ingotů 600 x 600mm z oceli. Termočlánky byly v kokile umístěny vertikálně (obr.8), u ingotů ve čtyřech místech v průřezu, u válce v pěti místech v průřezu. Další termická měření se provedla u těžkých válců, horních kovacích beranů a nosného kruhu při jejich tepelném zpracování.

Pro stanovení vývoje napětového stavu v odlitku při jeho tuhnutí, chladnutí a tepelném zpracování jakož i identifikace vad typu trhlin a prasklin vzniklých v odlitku se použila metoda akustické emise. Touto metodou se úspěšně proměřila řada odlitků různé konstrukce. Kromě toho skutečné číselné hodnoty zbytkových napětí v odlitku se stanovily tenzometricky na odlitku zkušební mříže.

K ucelenému výzkumu o podmínkách tuhnutí v odlitku a vzniku trhlin nebo prasklin, se provedl také výzkum pevnostních a elasticko-plastických vlastností materiálu v závislosti na teplotě. Jde o teploty krystalizace a v nižší teplotní oblasti plasticko-elastických vlastností materiálu, kdy v odlitku vzniká trvalá (zbytková) napětí.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Nejvýrazněji se výše uvedené procesy tuhnutí a chladnutí projevují a také studují u konstrukčně jednoduchých a masivních odlitků. **Teplotní pole, gradienty teplot** v průřezu ingotu 600x600mm o hmotnosti 4,8t jsou na obr.9. Čísla u křivek vyjadřují minuty od začátku tuhnutí /8/. Umístění čtyř termočlánků v průřezu ztuhlého ingotu ukazuje řezná plocha 30mm nad koncem termočlánku na obr.10. Z údajů na obou diagramech je zřejmé, že doba tuhnutí činila 109 min. a doba pásma tuhnutí ($T_1 - T_2$) činila 14 min. Naměřená doba tuhnutí 109 min. souhlasí také s dobou vypočítanou na PC pro válec o průměru 600mm (obr.11). Ve spodní části na obr. 9 je v časovém sledu uvedena narůstající tuhá vrstva, šířka pásma tuhnutí a zužující se pásmo tekuté fáze. Graficky jsou tyto závislosti na obr.12. Při setkání dendritů z protilehlých stěn (isolikvidy), což nastalo za 95 min. doby tuhnutí, již neexistuje pásmo volné taveniny a tvoří se uzavřený objem o průměru 130mm pásma tuhnutí za sítě dendritů a taveniny. V něm probíhá již dříve zmíněný další fyzikální děj – penetrace taveniny kapilárami mezi dendrity, od teplejšího místa likvidu do oblasti solidu. Jejím tuhnutím se zužuje pásmo ředin. Tento děj začíná při vytvoření cca 30% pevné fáze a končí při vyloučení cca 70% pevné fáze v pásmu tuhnutí /7/. Hlavním činitelem v tomto ději (z několika dalších) je kapilární tlak /16/:

$$p = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (13)$$

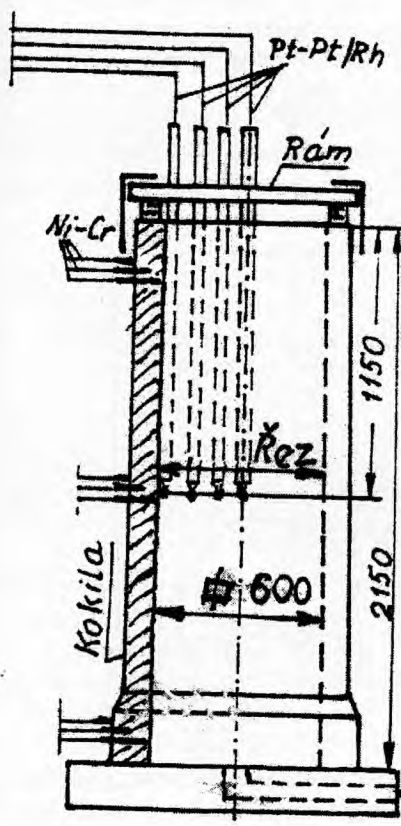
Kde: σ - povrchové napětí (tavenina – dendrit) ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
 r - poloměr kapiláry mezi dendrity (m)

Ze vztahu vyplývá, že zmenšováním průměru kapilár na růstáním dendritů se účinek kapilárního tlaku zvyšuje – tavenina je z vnějších míst dvoufázového pásma nassávána do oblasti tuhnutí (solidu). Tento děj však k plnému účinku vyžaduje čas a teplotu, tudíž nízkou rychlost tuhnutí centrálních oblastí odlitku. Proto zákonitě zvýšení rychlosti tuhnutí v těchto místech II. fáze je pro vnitřní kvalitu odlitků škodlivé, snižuje kladný vliv penetračního děje. To bylo rovněž experimentálně potvrzeno /16/.

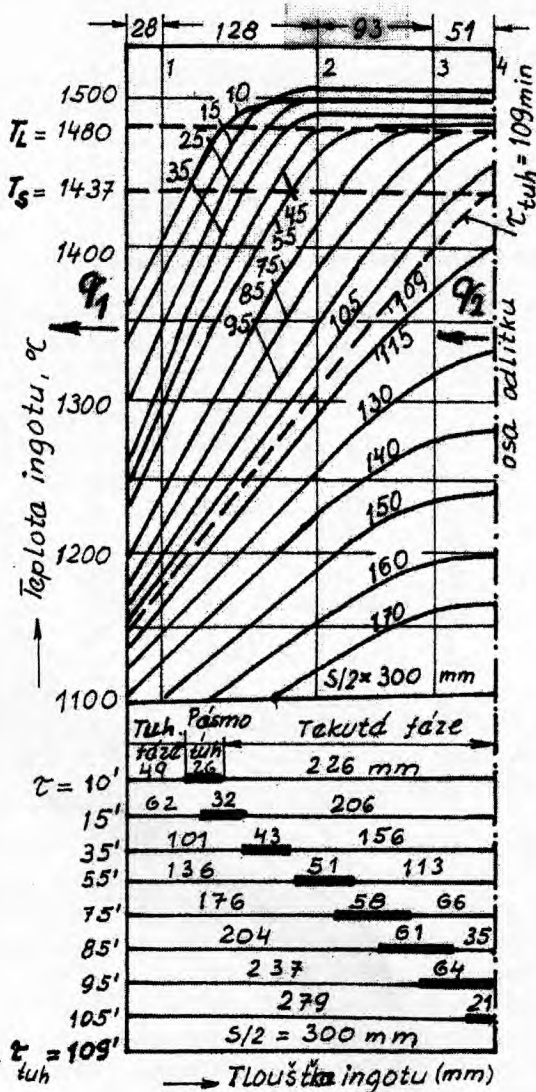
Z teplotního pole a průběhu teplotních gradientů v odlitku (obr.9) je zřejmé, že tuhnutí a chladnutí je založeno na časově proměnných veličinách, které činí tento děj tepelně neustáleným. V první části díky intenzivnímu odvodu tepla z odlitku q_1 rychle tuhnou a chladnou vnější vrstvy odlitku. To vede ke vzniku kladných teplotních gradientů v odlitku a proudění tepla q_2 ze středu k povrchu. Přibližně za 60 min. tuhnutí a ztuhlé vrstvy cca 150mm se oba tepelné toky vyrovnají a v dalším čase se zvyšuje rychlost tuhnutí a později i chladnutí vnitřních oblastí. Tomu napomáhá i snižování hodnoty

modulu odlitku M_0 . Postup tuhnutí a rychlost tuhnutí v průřezu ukazuje obr.13. Počáteční rychlost tuhnutí (dosahující až $17 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) klesla v hloubce cca 150mm za min. na hodnotu $1,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a v ose odlitku válce se zvýšila na hodnotu $5,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Počátek urychleného tuhnutí střední části a zkracování doby tuhnutí je v horní křivce pro tloušťku natuhlé vrstvy ozn. inflexním bodem. Experimenty v souladu s teorií potvrzují, že ve vnější části odlitku (ingotu) se vyskytují pásmové stvolové vycezeniny. V místech s nejnižší rychlostí tuhnutí se u kruhových odlitků (válců) tvoří tzv. „věncové vycezeniny“ v šířce 100 až 150mm (podle průměru odlitku). Detailní rozbor těchto tepelných procesů je v literatuře [12,17,6,7].

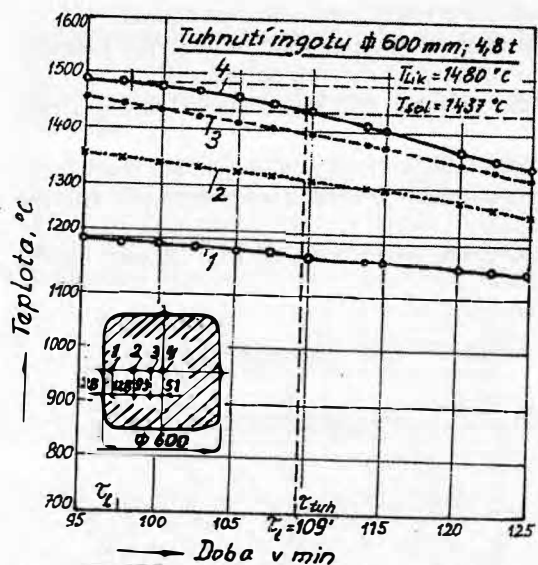
Se změnou rychlosti tuhnutí se mění také napěťová pole v odlitku. Nyní jsou vnější části (nebo tenké stěny) namáhány tlakem, ve vnitřních částech průřezu (nebo tlustých stěnách u složitých odlitků) jsou napětí tahová, kde se tvoří trhliny a později napětí zbytková, tvořící praskliny. Tato napětí se sčítají s napětím při tepelném zpracování. Výsledkem jsou praskliny, které vycházejí zevnitř odlitku k povrchu a jsou nebezpečné.



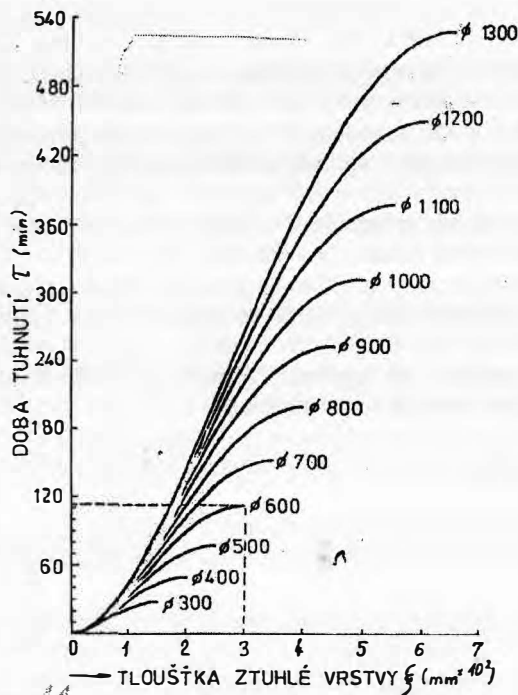
Obr. 8



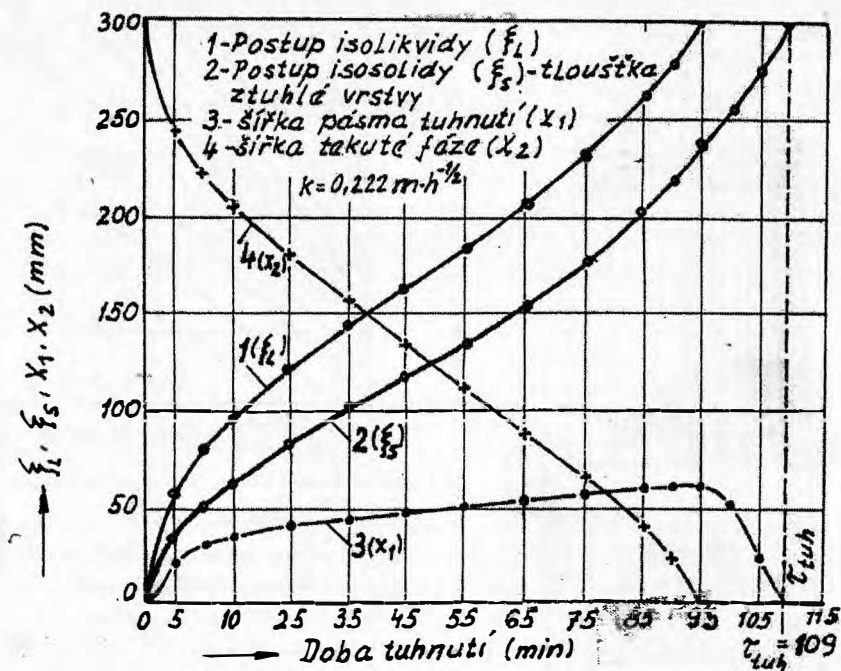
Obr. 9



Obr. 10 – Tuhnutí ingotu 600x600 mm, 4,8 tuny



Obr. 11



Obr. 12

Proto je nutno u masivních odlitků dobře určit rychlosti náhřevu i ochlazení. Na obr. 14 jsou výsledky teplotních procesů při tuhnutí válce o průměru 550 mm [17]. Diagram představuje teplotní gradienty v odlitku, v kokile a křivky tuhnutí v místech měření (1 – 5). Doba tuhnutí τ_{tuh} činila 83 min., časová hranice I a II fáze tuhnutí se projevila za 45 min., při ztuhnutí vrstvy o tloušťce 123 mm. V té době se oba tepelné toky vyrovnaly.

V další fázi tuhnutí je intenzita ochlazování středu vyšší než povrchu, čím se opět mění teplotní a napěťové poměry v odlitku. Za 65 min. vzniká u křivky 1 (povrch) prodleva, neochlazuje se, zatímco střední oblasti (4,5) intenzivně chladnou. Rychlost tuhnutí válce průměr 600mm ukazuje obr.15. Nejnižší rychlost 2,8mm . min.⁻¹ odpovídá hloubce 180mm a v ose válce dosahuje 6mm . min.⁻¹. Nyní záleží pouze na pevnostních a plastických vlastnostech materiálu odlitku, vzniknou-li v odlitku příčné trhliny či nikoli. Nestačí pouze jedna vlastnost, nutno posuzovat pevnost a plasticitu. Pevnost tvoří odpor proti vzniku poruchy, plasticita v určitém procentu eliminuje napětí. Uvedený charakter napěťového pole zůstává v odlitku až do jeho vychladnutí. Další nebezpečný časový úsek nastává při dosažení teploty odlitku 650°C pro ocel a 450°C pro litinu, kdy se v materiálu tvoří určitý podíl elastických (pružných) deformací. Při dosažení kritické teploty T_{kr} (~550°C u oceli a ~350°C u litiny) je elastických deformací v materiálu takový objem, že se v odlitku vytváří trvalé (zbytkové) napětí, které se s dalším chladnutím zvětšuje podle velikosti teplotního gradientu v odlitku ΔT . Potom konečný stav napětí je dán vztahem

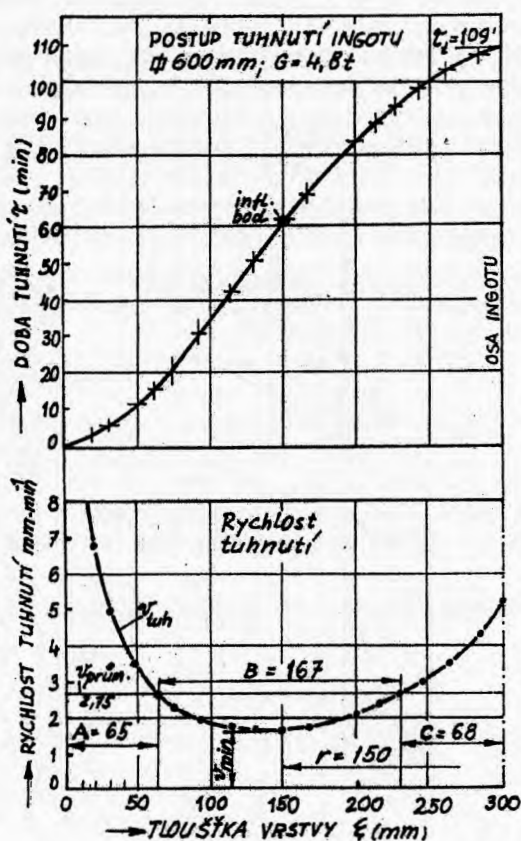
$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{MPa})$$

(14)

Kde: E – modul pružnosti v tahu (MPa)
 α – součinitel tepelné dilatace (1/°C)
 ΔT – rozdíl teplot v odlitku (°C)

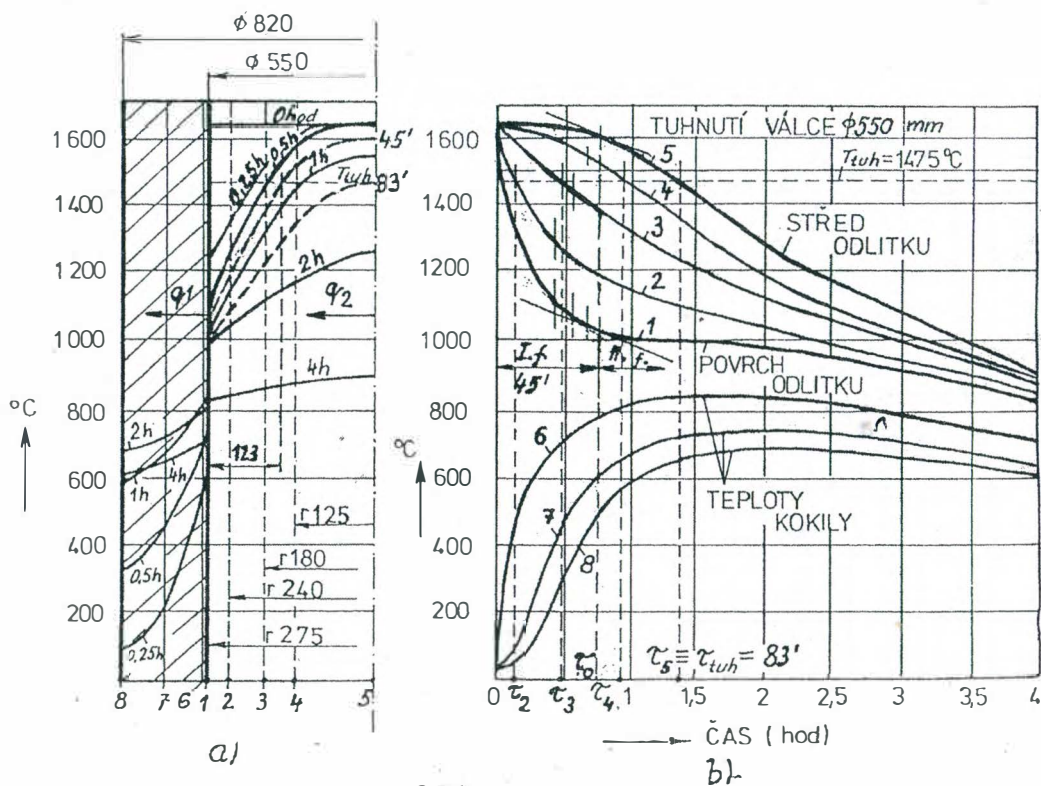
Z uvedeného vyplývá, že v praxi lze řídit stav napjatosti velikostí rozdílu teplot ΔT v okamžiku dosažení teploty T_{kr} u vnitřní části odlitku. Čím je menší rozdíl teplot odlitku v tomto okamžiku přechodu odlitku do pásma semiplastických deformací, tím nižší budou zbytková napětí v odlitku.

Vývoj charakteru napěťového stavu v odlitku v procesu jeho tuhnutí, chladnutí a tepelného zpracování se zkoumal pomocí akustické emise. Měření se provádělo ve spolupráci s Ing. J. Crhou, CSc. z Výzkumného ústavu VŽ. Snímání akustických impulsů se provádělo pomocí zvukovodu, tyče zatuhnuté v odlitku a převodem emisních údajů do speciálního zařízení a počítače. Z diagramu na obr.16 emisní aktivity válce o \varnothing 1240mm vyplývá, že po dobu tuhnutí nevykazuje odlitek emisní činnost (napětí). Ta nastává až transformačním napětím přeměnou fáze $\gamma \rightarrow \alpha$ při dosažení teplot cca 720°C na povrchu odlitku a dále do hloubky průřezu. Při fázové přeměně se zvětšuje objem, takže se v povrchové vrstvě nyní již tlakové oblasti, napětí do určité míry zvětšuje a může dojít k mírné plastické deformaci, čímž se napětí mírně uvolní, což znázorňuje pokles křivky v bodě A a B. Výrazně je to ovšem patrné v centrální oblasti, kde se nachází tahové napětí a zvětšením objemu při úplné fázové přeměně s prodlevou dochází k podstatnému snížení transformačního napětí v odlitku.

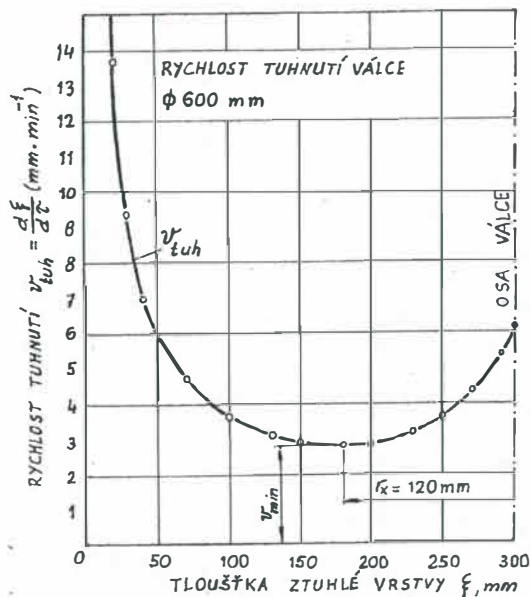


Obr. 13

Další vzestup emisní činnosti na diagramu představuje napětí tepelné, vyvolané pozvolným přechodem materiálu do oblasti elastických deformací (pod 650°C). Vzniká vnitřní tepelné napětí (max. II E), které v odlitku zůstává jako napětí trvalé (zbytkové, reziduální). Působí deformaci a praskliny v odlitku. Jeho hodnota se snižuje žháním.



Obr. 14

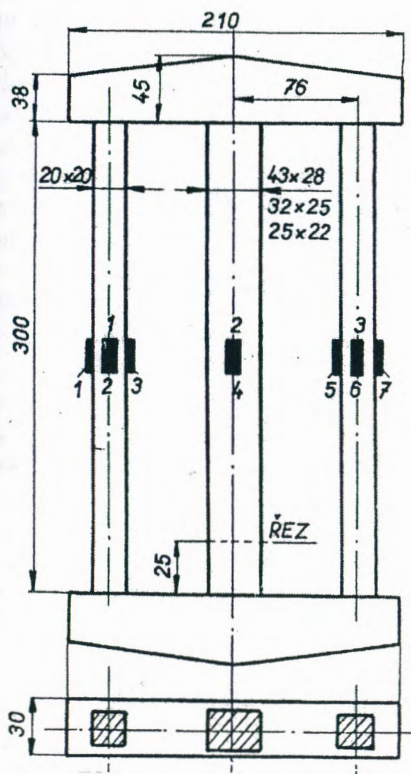


Obr. 15

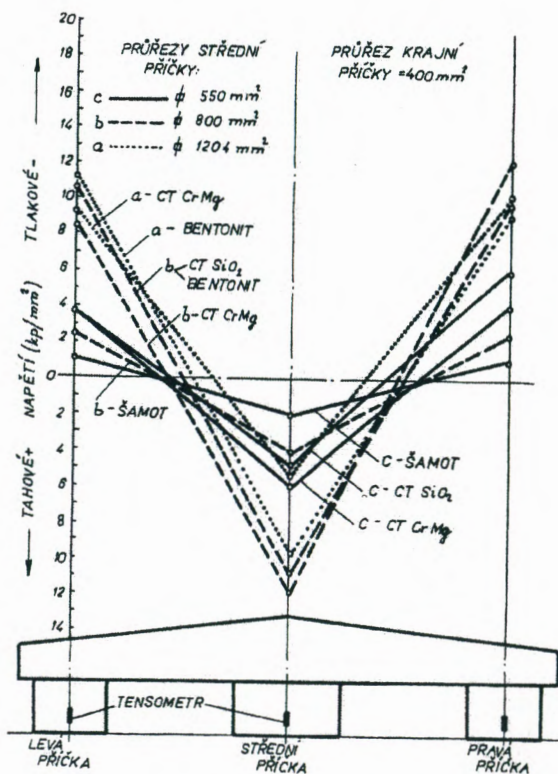
Stanovení číselného stavu trvalé napjatosti v odlitku se určoval tenzometricky na zkušební mříži (obr.17) se dvěma tenčími krajními tyčemi a střední tlustší tyčí na obou koncích spojených příčnicí. Pnutí je větší při větším rozdílu průřezu střední a krajních tyčí. Proto se výzkum rozšířil o vliv konstrukce tím, že se volily 3 rozdílné průřezy střední tyče. Kromě toho se každý tento typ odlil do rozdílných formovacích směsí: CTCrMg, CTSiO₂, bentonitové a šamotové směsi, s rozdílnou hodnotou součinitele tepelné akumulace b_f . Některé výsledky vnitřního zbytkového napětí ukazuje obr.18. V bočních tenkých tyčích je napětí tlakové, ve střední tlustší tyči napětí tahové. Výše napětí se řídí tloušťkou střední tyče a druhem formy. Čím je tlustší tyč a forma s vyšší intenzitou chlazení, tím vyšší jsou zbytková napětí v odlitku. Kompletně tyto závislosti ukazuje obr.19. Rozdíl teplot ΔT se určil z naměřených křivek tuhnutí mezi tenkou a tlustou tyčí. U odlitků typu konstrukce a (nejtlustší střední příčka) odlitých do směsi CTCrMg byla napětí tak vysoká, že většina odlitků praskala již ve formě.

Měření pevnostních a elasticko-plastických vlastností materiálů v závislosti na teplotě se provádělo v nově vybudované laboratoři na katedře slévárenství společně s Ing. P. Kozelským, CSc., který má také velké zásluhy na vybudování této laboratoře. Pro stručnost zde uvádím výsledky měření některých ocelí a litin pro odlitky. Z obr.20 vyplývají dvě důležitá zjištění:

- První ztuhlá vrstva kovu při teplotách solidu má minimální pevnost v tahu, 2 – 5 MPa, kterou označujeme jako krystalizační pevnost /20/.
- Má také nulovou tažnost, tzn. je křehká (primární křehkost). To potvrzují také tvar a struktura lomu.



Obr. 17

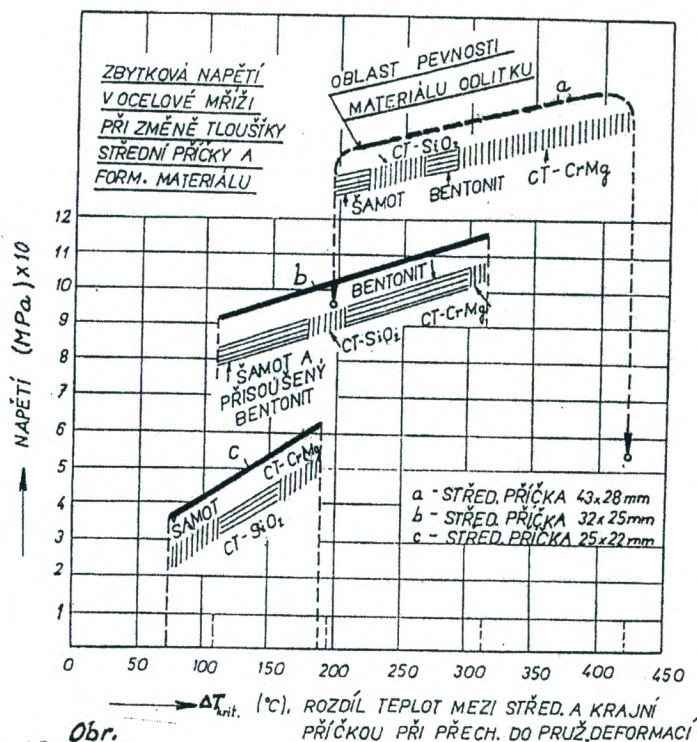


Obr. 18 – Průběh zbytkových napětí ocelových mříží



K porušení ztuhlé vrstvy může proto dojít velmi snadno, např. jejím smrštěním a odporem sloupce kovu, jádra, formy apod. Poklesem teploty kovu pevnost mírně stoupá, ale plasticita náhle dosahuje stoprocentního zvýšení. Tento stav trvá do teploty cca 1250 °C (u ocele 422712 až do teploty 1130°C), kdy plasticita opět klesá do úrovně 40 – 60%, což označujeme jako sekundární křehkost, přičemž od teploty 1000°C opět vzrůstá na hodnotu 80%. Pevnost chladnutím vzorku mírně vzrůstá a při 1000°C se křivky pro jednotlivé značky ocelí začnou větvit podle obsahu uhlíku. Materiály s vyšším obsahem C mají vyšší pevnost. Pro litinu s kuličkovým a lupínkovým grafitem platí výsledky na obr.21. Krystalizační pevnost při teplotách blízkých solidu je opět nízká 6 a 8 MPa, u obou materiálů mírně stoupá s chladnutím vzorku. Plasticita u litiny s lupínkovým grafitem je zanedbatelná při všech teplotách měření. U litiny s kuličkovým grafitem plasticita vystoupila z nízké hodnoty na 30% A po celou dobu chladnutí se pohybovala mezi 30 – 50%.

Teplotný efekt vzniká v odlitku při jeho tepelném zpracování nebo v jiných případech při změně teplotního pole. Je vyjádřen zvýšením teploty ve středu stěny odlitku (kovového tělesa) při jeho určitém tvaru a hmotnosti. Jde o velmi zajímavý fyzikální jev, jež vychází z dynamiky tepelného a napětového procesu, který je možno vysvětlit následovně. Je závislý na tvaru odlitku, umožňující tvarovou deformaci, mající rozdílnou tloušťku stěny po obvodu odlitku a na rychlosti ochlazování. Ochlazením vznikne nerovnoměrné teplotní pole mezi tenkou a masivnější stěnou, jakož i ve stěně samé. Vlivem těchto procesů se vyvine vnitřní pnutí a následná deformace tvaru odlitku, čímž vzniká přetvárná práce, tato se mění v teplo, které se soustřeďuje uvnitř stěny, protože odlitek je ochlazován po celém povrchu. Tím se teplota uvnitř stěny zvýší a velký teplotní gradient ve stěně může způsobit vznik poruchy materiálu. Nutno zdůraznit, že nejde o teplo vzniklé v odlitku mechanickou prací, namáháním, nýbrž jde o vnitřní teplo vyvinuté z napětí a deformací. Čím větší a těžší je odlitek s možností tvarových deformací a rychlým ochlazením (ohřevem), tím více tepla se vyvine a ve středu stěny se zvýší teplota. Děj trvá tak dlouho, až se deformační síly vyčerpají.



Obr. 19

Jako příklad uvádím velmi zřetelný projev tohoto tepelného efektu, vzniklého při tepelném zpracování odlitku tankové věže, kde tvar, dostatečné rozměry po délce a šířce, rozdílné tloušťky stěn přední části 180mm, zadní části 75mm a hmotnosti 7200 Kg, dovolují při chladnutí velké tvarové deformace a tím vzniklé přetvárné práce a její přeměnu v teplo. Odlitek byl ochlazován po celém povrchu zvnějšku i zevnitř. Režim tepelného zpracování byl následující:

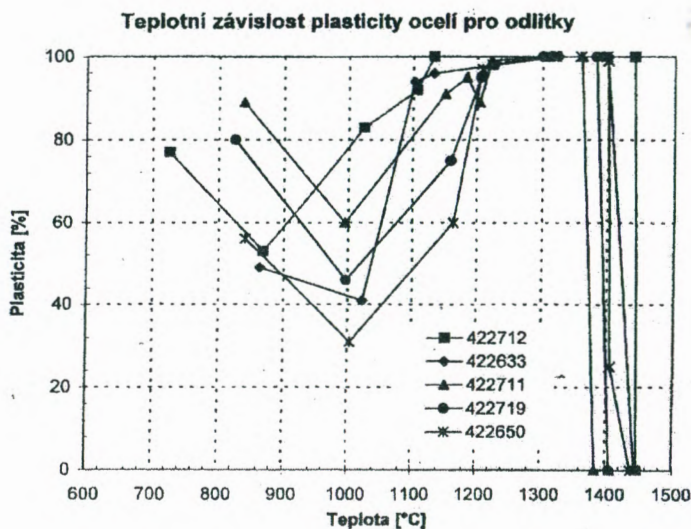
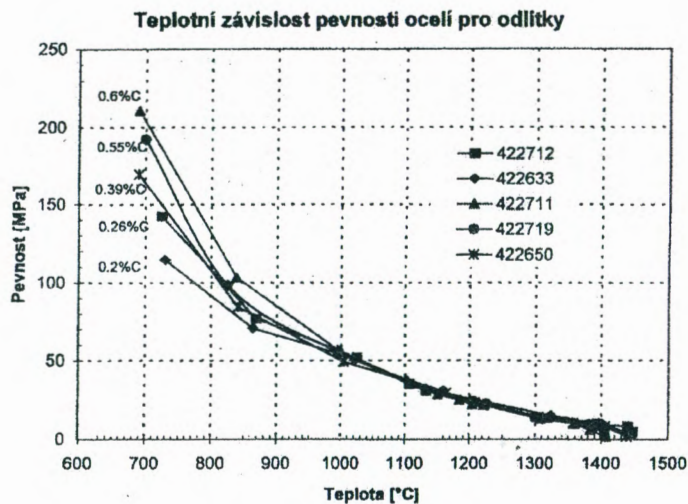
Homogenizace při 1200 °C (po skončení prodlevy na uvedené teplotě pouze otevření vrat pece), došlo ke zvýšení teploty v ose stěny o cca 42 °C,

Normalizace při 1000 °C (odlitek vytažen z pece na vzduch), zvýšení teploty ve středu odlitku o 270 °C,

Kalení při 800 °C (odlitek byl pomocí speciálního zařízení i s termočládky ponořen do vodní lázně na dobu 23 min., zvýšení teploty v ose stěny o 150 °C),

Popouštění při 650 °C (řízené chladnutí v peci), zvýšení teploty v ose stěny o 63 °C.

Jak je zřejmé, u všech těchto režimů došlo v místech přechodu stěn s rozdílnou tloušťkou ke zvýšení teploty ve středu stěny, tzn. enormně se zvýšil teplotní gradient ve stěně mezi středem a povrchem, který se ochlazoval. Tak vysoká napětí mohl vydržet pouze materiál s vysokou plasticitou, kterou takový komponent musí mít, obsahující 1 – 1,5% Cr, 3,5% Ni a 0,35 – 0,50% Mo. Na obr.22 je tento děj zaznamenaný při režimu normalizace. Teplota v centru stěny stoupla podle diagramu až na 1030 °C, tj. o 270 °C a na původní teplotu vytažení odlitku z pece 760 °C, klesla až za 1 hod. (termočládky C a A). Na obr.23 jsou výsledky měření při kalení odlitku. Při vytažení odlitku z pece se teplota pozvolna zvyšuje, ponořením odlitku do vody je vzestup teploty náhlý a dosahuje 730 °C, tzn. zvýšila se o 150 °C nad teplotou výchozí. Okamžitý vzestup teploty i rychlost ochlazení na tutéž teplotu za 6 min. svědčí o rychlém prochlazení odlitku ve vodní lázni, což bylo účelem. Celý proces ochlazení do teploty 150 °C trval 23 min. V diagramu je také zaznamenaný okamžik porušení třech termočládků, zřejmě tepelným šokem při ponoření odlitku do vody.

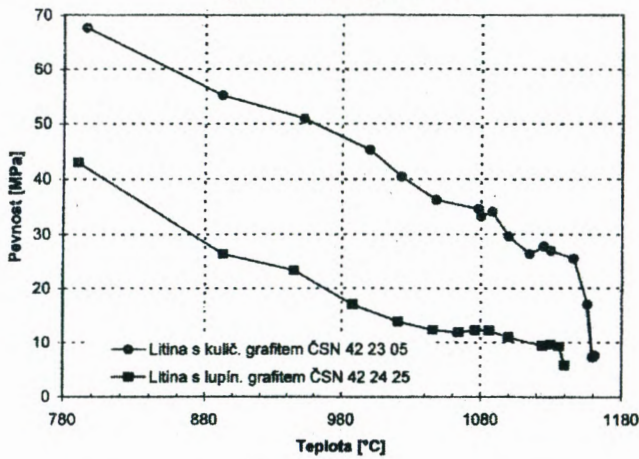


Obr. 20

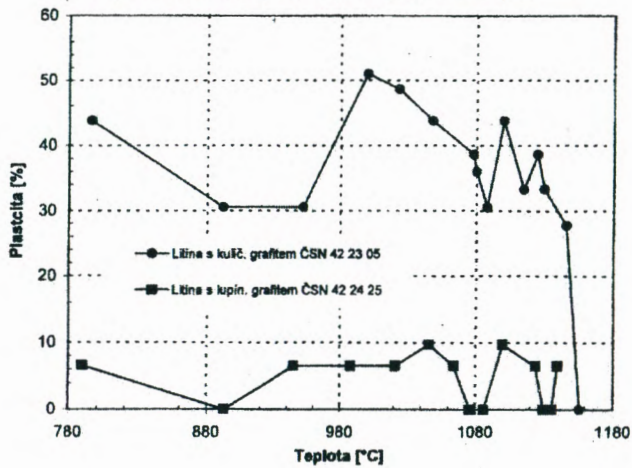
ZÁVĚR

Přednáška pojednává stručně o podstatě a vývoji geometrického modulu odlitku a jeho úloze v procesech tuhnutí a pnutí. V další části jsou dokumentovány experimentální výsledky tuhnutí a pnutí na podporu teoretických úvah k tomuto problému. V přednášce je také stručná zmínka o nových experimentálních metodách a způsobech zkoumání procesu tuhnutí a vývoje napěťového stavu v odlitku, jakož i vlastnostech materiálu pro odlitky za vysokých i středních teplot a jejich měření. Výsledky jsou důležité pro prevenci vzniku poruch souvislosti materiálu.

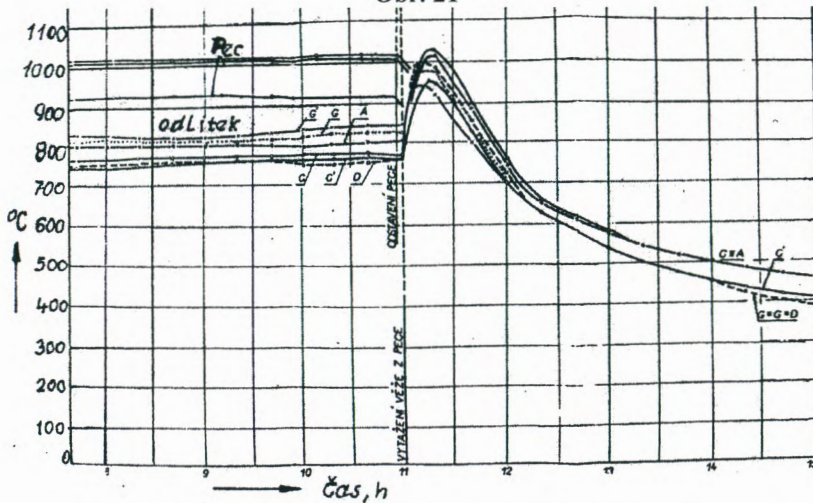
Teplotní závislost pevnosti litin



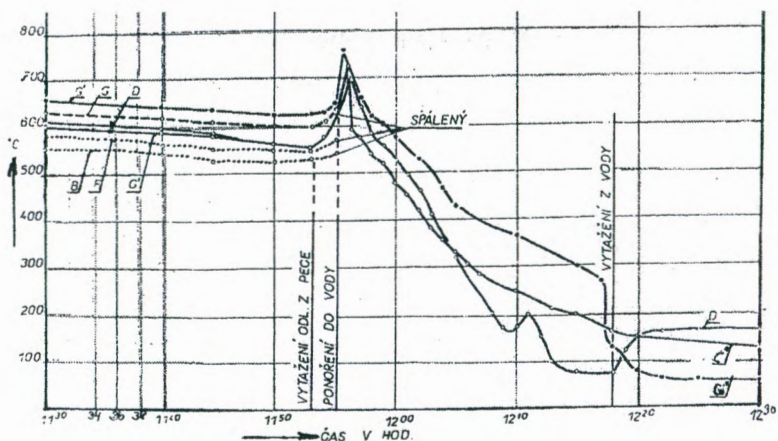
Teplotní závislost plasticity litiny vyjádřené zúžením



Obr. 21



Obr. 22 – Tepelný efekt při normalizaci tankové věže



Obr. 23 – Tepelný efekt při kalení tankové vže

LITERATURA

- [1] CHVORINOV, V.: Theorie der Ersatung von Gusstücken Giesserei, č.10,12,27,199,1940.
- [2] SCHWARZ, C: Archiv für Eisenhüttenwesen, 5,139,1931.
- [3] CHVORINOV, V.: Krystalizace a nestejnorodost oceli NČAV, Praha, 1954.
- [4] HAVLÍČEK, F.: Fyzikální zákonitosti řízeného tuhnutí odlitků, Sb. Vědeckých prací VŠB, řada hutnická, 2/1991,r.XXXVI/I, s.49.
- [5] HAVLÍČEK, F., KOSŇOVSKÝ, Z.: Stanovení rychlosti tuhnutí odlitků, Slévárnictví, 1978, XXVI, č.1,s.15-20.
- [6] NARITA, MORI: Freezing Rate and Internal Struktura of Heavy Karbon Steel Ingot, Presented 75th ISU Meeting , Tokio, 1978.
- [7] VEJNIK, A.I.: Teploobmen mežu slitkom a izložnicej, Metallurgizdat, Moskva, 1984 (II. vydání).
- [8] HAVLÍČEK, F.: Experimentální měření doby tuhnutí a teplotního pole ingotu a kokily, Vývojová zpráva, VŠB Ostrava – TŽ Třinec, 1973.
- [9] ELBEL, T., HAVLÍČEK, F.: Tuhnutí a chladnutí ocelových odlitků, I. a II. díl, Slévárnictví, č.10, 1970.
- [10] HAVLÍČEK, F.: Tuhnutí odlitku válce, Konference o válcích pro tváření, VŽKG, Ostrava, 1985.
- [11] FRENKEL, J.J.: Úvod do teorie kovů, SNTL, Praha, 1955.
- [12] HAVLÍČEK, F.: Tepelně-fyzikální pochody mezi ingotem a kokilou, Hutnické aktuality, VÚHŽ, Praha, roč.10, č.1, 1969.
- [13] GULJAJEV, N.: Teorija litějnych procesov, Mašinostrojenije, Leningrad, 1976.
- [14] PŘIBYL, J.: Teoretické základy slévárnictví, I., II, ES VŠB, Ostrava, 1966.
- [15] HAVLÍČEK, F.: Měření teplotního pole při tuhnutí a tepelném zpracování ocelového odlitku, Technická zpráva, Martin, 1967-68.
- [16] HAVLÍČEK, F.: Teorie slévárnictví, Výběr přednášek, ES VŠB, Ostrava, 1992.
- [17] HAVLÍČEK, F.: Měření teplotních režimů při tuhnutí těžkých odlitků a režimů tepelného zpracování, Zprávy tech. Rozvoje závodu 3, VŽKG, 1975-1988.
- [18] HAVLÍČEK, F., CRHA, J.: Aplikace metod akustické emise při tuhnutí, chladnutí a tepelném zpracování těžkých ocelových odlitků, Práce tech. Rozvoje závodu 3, VŽKG, 1977-1986.
- [19] HAVLÍČEK, F.: Měření napětí v pokusných odlitcích termometry, Výzkumný úkol Katedry slévárnictví, VŠB, Ostrava, 1969-1972.
- [20] HAVLÍČEK, F., KOZELSKÝ, P.: Krystalizační pevnost slitin železa v oblasti teplot solidu, Záv. Zpráva projektu GAČR č. 106/93/0755.